

DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN RAMALES DE RIEGO POR GOTEO SUBSUPERFICIAL

L. Rodríguez Sinobas¹, M. Gil Rodríguez², R. Sánchez Calvo¹ y L. Juana Sirgado¹

¹ Profesores de Ingeniería Hidráulica y Riegos. E.T.S.I. Agrónomos. Grupo de Investigación Hidráulica del Riego de la Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria, 28040 Madrid.

² Estudiante de Doctorado del Grupo de Investigación Hidráulica del Riego de la Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S.I. Agrónomos. Ciudad Universitaria, 28040 Madrid.

Resumen

El riego por goteo subsuperficial es cada vez más utilizado. Entre sus ventajas con respecto a otros métodos de riego destaca la necesidad de una menor cantidad de agua ya que se reduce la evaporación. Una de las diferencias importantes de este riego con el de goteo superficial es que el desagüe del emisor puede verse afectado por las características hidrofísicas del suelo. En su punto de desagüe se produce una sobrepresión cuyo valor es mayor en suelos con infiltración pequeña. El efecto de esta sobrepresión es menos acusado en emisores compensantes, siempre que no se alcancen valores tales que la diferencia de presiones a ambos lados del elastómero se encuentre por debajo del límite inferior de su intervalo de compensación. El caudal de los emisores no compensantes se verá reducido, incluso con valores de sobrepresión pequeños, por lo que los altos índices de uniformidad característicos del riego por goteo superficial podrían verse reducidos en el riego subsuperficial.

En el proyecto de sistemas de riego por goteo, la selección de las variables de proyecto se hace atendiendo a la variación hidráulica de la unidad y a la variabilidad de manufactura del gotero. Sin embargo, en el proyecto de unidades de riego subsuperficial se deben considerar también las características hidráulicas del suelo, que van a afectar a la sobrepresión del suelo y al gasto del emisor. El efecto de la sobrepresión condiciona, también, el manejo del sistema de riego. La programación del riego y la dosis a aplicar suelen calcularse considerando el caudal nominal del emisor. Predecir y comprobar en campo la distribución de agua a lo largo de un ramal de riego subsuperficial podría desaconsejar el uso de algunos modelos de emisores en determinados suelos, dada su mala uniformidad con éste método de riego.

Abstract

One of the drawbacks of subsurface irrigation is the decrease in the dripper flow rate as a result of overpressures generated in the soil at the discharge point. This will, due to the impact of soil hydrophysical features, possibly result in less uniform irrigation. In this paper the performance of subsurface irrigation laterals in the field is evaluated. Laterals of 50 m long with two different emitters (one pressure-compensating and the other non-compensating) were selected. Irrigation was applied over 30 min at three different inlet pressures. Inlet flow and inlet and tail pressures were recorder over the irrigation,

simultaneously, in a couple of laterals. Results were compared with the ones obtained in surface laterals.

The discharge variation on the compensating emitter was higher than the regular emitter. Its elastomer might suffer fatigue while it is being held under pressure. Estimations of uniformity of water application were calculated using a Matlab program considering uniform soils. Subsurface irrigation laterals shown a little better uniformity than surface ones. Simulations for other uniformity soils evidence that uniformity of water applications increases in soils with loam and clay texture.

1. Introducción, Objetivos

En el riego subsuperficial, el caudal q de un emisor depende de sus características hidráulicas y de las características hidrofísicas del suelo. Las primeras determinan la ecuación de gasto del emisor [1]:

$$q = k \cdot h^x \quad [1]$$

donde: h es la altura de presión en el punto de inserción del emisor y, k y x son constantes de ajuste.

Si se considera además el coeficiente de variación de manufactura y uso del emisor CV_m , la ec. [1] se transforma en:

$$q = k \cdot h^x (1 + u \cdot CV_m) \quad [2]$$

donde u es una variable aleatoria con distribución normal tipificada $N(0,1)$.

El movimiento del agua en riego subsuperficial se estudia considerando al emisor como una fuente puntual enterrada con caudal continuo alrededor de la cual se desarrolla una zona saturada, con presión positiva. Philip (1992) desarrolló una solución aproximada de la distribución de presiones alrededor de una fuente esférica subsuperficial, para lo cual igualó el flujo de la región saturada que rodea la cavidad con el estimado para la zona subsaturada. Shani y Or (1995) utilizaron la solución de Philip y relacionaron la presión generada en el suelo h_s con las propiedades hidráulicas del suelo y el caudal de la fuente q_f a partir de la expresión siguiente:

$$h_s = \left(\frac{2 - \alpha \cdot r_o}{8 \cdot \pi \cdot K_s \cdot r_o} \right) \cdot q_f - \frac{1}{\alpha} \quad [3]$$

con K_s = conductividad hidráulica del suelo en saturación, r_o = radio de la cavidad esférica y α = parámetro de ajuste de la expresión de Gardner (1958) de la conductividad hidráulica K en subsaturación, con $K = K_s \cdot e^{-(\alpha \cdot \psi)}$, donde ψ representa el potencial matricial del suelo.

La aproximación [3] se cumple cuando:

$$q_f \leq \frac{4 \cdot \pi \cdot K_s}{5 \cdot \alpha^2}$$

De producirse la sobrepresión h_s alrededor del emisor, la ec. [2] se transforma en

$$q = k \cdot (h - h_s)^x \quad [4]$$

y, si se incluye la variación de manufactura y uso del emisor, se obtiene:

$$q = k \cdot (h - h_s)^x (1 + u \cdot CV_m) \quad [5]$$

Cuando la capacidad de infiltración del suelo en el punto de desagüe limita al caudal del emisor, se producen allí presiones superiores a la atmosférica. El gradiente de presión entre el agua en el interior del emisor y el punto de desagüe disminuirá, reduciéndose también el gasto del emisor según las ec.[4] y [5].

Shani et al. (1996) midieron, en campo, la presión del agua en el punto de desagüe h_s en varios modelos de emisores compensantes y no compensantes. Se observó que h_s aumentaba, de forma acusada, durante los primeros 10 ó 15 min y luego se estabilizaba. En suelos donde la infiltración es menor que el caudal del emisor la diferencia de presiones a través del emisor disminuye y, por tanto, también su descarga atendiendo a la ec. [4]. Se observó una disminución del caudal del 10% al 50% en los suelos medidos, correspondiendo la mayor reducción al suelo con poros finos y a emisores con mayor caudal. En sus conclusiones aconsejan utilizar modelos de emisores compensantes en suelos con K_s pequeña mientras que en suelos con K_s grande los dos tipos de emisores podrían dar resultados similares.

Lazarovitch et al. (2005) midieron h_s en campo en emisores aislados no compensantes introducidos en una pequeña esfera de plástico perforado. Se utilizaron dos esferas de plástico de distinto radio r_o . Para un mismo caudal, observaron que h_s aumentaba al disminuir r_o y, asimismo, que su variación fue más acusada con valores r_o pequeños. Los datos de campo fueron contrastados con simulaciones realizadas con HYDRUS-2D. Se observó que, para un caudal de emisor y para un radio de la cavidad esférica constante, el efecto de K_s es mayor que el de α en el desarrollo de presiones positivas.

Gil et al. (2008), en estudio experimental de suelos colocados en macetas, han observado que la variabilidad del caudal de los emisores no compensantes en el riego subsuperficial, prácticamente, coincide con la del superficial en suelos arenosos homogéneos. En ellos, la variabilidad de la sobrepresión en el suelo es pequeña. Por el contrario, en suelos francos la variabilidad en la sobrepresión es mayor, lo que podría producir una variabilidad del caudal menor que en el riego superficial. Asimismo, en emisores compensantes, la variabilidad del caudal en riego subsuperficial coincide con el superficial en ambos suelos, lo que se explica porque en las condiciones experimentales no se sobrepasó el límite inferior del rango de compensación del gotero, y la variación de sobrepresión del suelo fue contrarrestada por la regulación del elastómero. En un suelo homogéneo, la uniformidad en la aplicación del agua en un ramal de riego por goteo subsuperficial sería mayor que la del goteo en superficie porque la sobrepresión alcanzada en el suelo actuaría como un elemento regulador, de manera que a los emisores con un mayor caudal en el riego superficial correspondería una mayor sobrepresión en el suelo, por lo que disminuiría su caudal, en mayor medida que los emisores con un caudal menor, en riego subsuperficial.

Por otra parte, la variación del gasto del emisor respecto del caudal nominal del gotero afecta a la uniformidad de la aplicación del agua por el sistema. Warrick y Shany (1996) determinaron los coeficientes de uniformidad de la aplicación del agua en un ramal de goteo para el que, en los puntos del suelo donde estaban colocados los emisores, se determinaron los valores de conductividad hidráulica y parámetro α a partir de un semivariograma. En su estudio no se consideró ni la variabilidad hidráulica del ramal ni la variabilidad de

manufactura del emisor. Los resultados mostraron variaciones de gasto máximas de un 30% que correspondieron a valores del coeficiente de variación del gasto CV desde 0,07 hasta 0,19.

Lazarovich et al. 2006 también simularon la distribución del agua en un ramal de riego subsuperficial con una altura de presión en cabeza $h_0 = 2$ mca pero, al contrario que en el estudio precedente, se estudió la variabilidad hidráulica del ramal considerando la expresión de Darcy-Weisbach para el cálculo de pérdidas de carga. Los resultados muestran que CV aumenta al aumentar el caudal del emisor, obteniéndose valores de $CV = 0,014, 0,036$ y $0,08$ para caudales del emisor de 2, 4 y 8 L/h, y para una variabilidad espacial de las condiciones de suelo fijadas.

El efecto de la sobrepresión alrededor del emisor condiciona el manejo del sistema de riego. Su programación y la dosis a aplicar en cada riego suelen calcularse considerando el caudal nominal del emisor, por lo que la disminución del caudal aplicado al principio del riego puede afectarles. La confirmación de los resultados observados por los autores anteriores podría desaconsejar el uso de éste método de riego en diferentes modelos de emisores, dada su mala uniformidad. Incluso en situaciones de campo, aceptando dichos valores, el tiempo de riego debería ser aumentado para compensar la disminución de caudal medio del ramal.

Asimismo, la uniformidad de la distribución del agua en un ramal de riego subsuperficial ha sido abordada con simulaciones numéricas. Las situaciones simuladas muestran que la uniformidad de la aplicación del agua disminuye, pero no hay ningún estudio experimental que confirme los resultados obtenidos. Asimismo, el valor de la h_s en el punto de desagüe y su evolución con el riego han sido observados con emisores individuales, en campo ó en laboratorio. Conviene pues comprobar si en el ramal siguen un comportamiento similar.

2. Materiales y Métodos

Se han enterrado, a 30 cm de profundidad en un suelo de textura franca, 12 ramales de riego subsuperficial de 50 m de longitud con emisores separados 30 cm. El esquema de la instalación se detalla en la Figura 1. Se seleccionaron dos tipos de emisores de riego integrados, uno compensante (A) y otro no compensante (B), cuyas ecuaciones de gasto y coeficientes de variación de manufactura fueron obtenidos en mesa de ensayos de goteo (ver Tabla 1). Seis de los ramales correspondieron a un tipo y los restantes a otro. El riego se aplicó durante 30 minutos a cada pareja de ramales con la misma presión de trabajo. La presión en cabeza de los ramales h_0 fue, aproximadamente, de: 8, 10 y 15 mca en la primera, en la segunda y la tercera pareja de ramales, respectivamente. A lo largo el riego se midieron, con dos sensores de presión, y se registraron las presiones en cabeza y cola de cada ramal. Asimismo, se midió a lo largo del riego, con un contador volumétrico tipo Woltman, el tiempo que tardaba en pasar un volumen de 3 L de agua en cabeza de cada ramal. Por otra parte, se ensayaron otros 12 ramales de los mismos emisores en laboratorio para la caracterización hidráulica del ramal (ver Tabla 1) y para comparar los resultados observados en los ramales subsuperficiales.

La distribución del agua en el ramal ha sido simulada con un programa informático, escrito en MATLAB, en el que se ha considerado tanto la variación hidráulica del ramal como la variabilidad debida a la manufactura del emisor y a las propiedades hidrofísicas del suelo. Se eligieron valores de h_0 comprendidos entre 5 y 15 mca (rango habitual en el riego por goteo subsuperficial) y se compararon los resultados con los obtenidos en el riego de dichos

ramales colocados en la superficie del suelo y con las observaciones de campo. Se ha utilizado la ecuación de pérdidas de carga de Blasius.

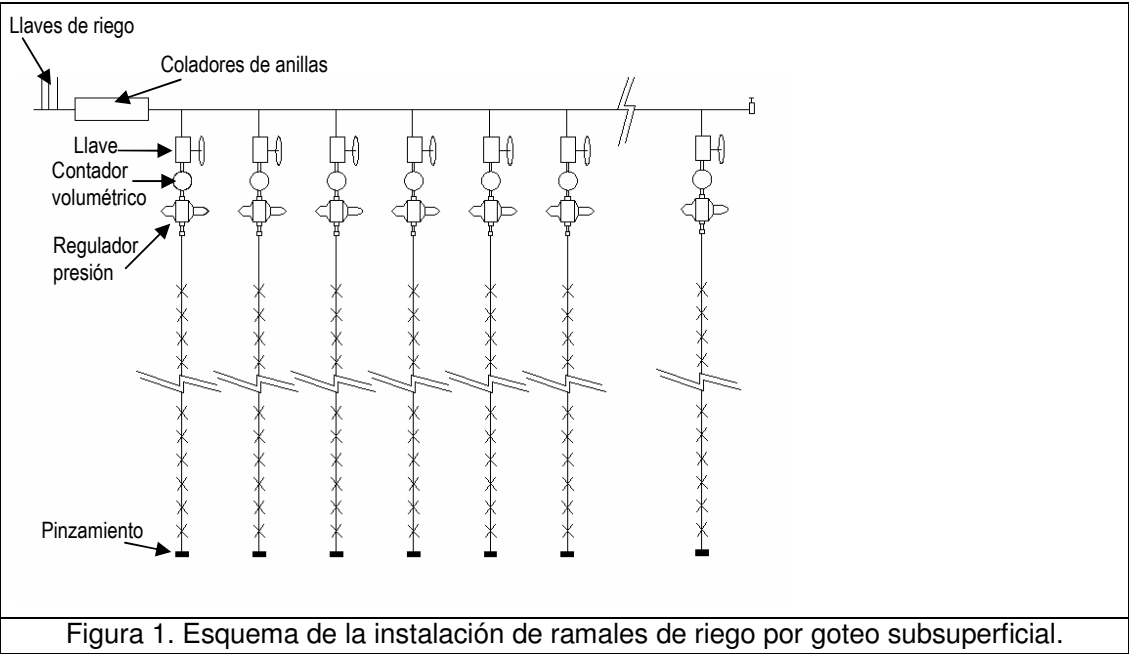


Figura 1. Esquema de la instalación de ramales de riego por goteo subsuperficial.

Tabla 1. Caracterización hidráulica de emisores.

	$k \text{ (L/h)/mca}^x$	x	CV_m	$q_n \text{ (L/h)}$	$l_e \text{ (m)}$
A	1,20	0,49	0,058	3,73	0,76
B	3,40	0,02	0,032	3,58	0,76

Nota: q_n = caudal nominal del emisor y l_e = longitud equivalente en el punto de inserción del emisor.

La ecuación [2] de gasto del emisor se usa para la determinación de la distribución del agua desde el ramal superficial, y la ec. [5] para el ramal enterrado. La uniformidad de dicha distribución se hace corresponder con un coeficiente de variación CV .

$$CV = \frac{\sigma_q}{\bar{q}} \quad [6]$$

donde: σ_q es la desviación estándar del caudal y \bar{q} es el caudal medio del ramal.

Los valores de K_s y α característicos del suelo se tomaron de Carsel and Parrish (1988) y se muestran en la Tabla 2. Los valores r_0 variaron de 0,001 a 0,006 m.

Tabla 2. Propiedades hidrofísicas de los suelos simulados.

SUELO	$K_s \text{ (m/s)}$	$\alpha \text{ (m}^{-1}\text{)}$
Franco	$2,89 \cdot 10^{-6}$	12,9
Franco-arenoso	$1,23 \cdot 10^{-5}$	22,6
Arenoso	$8,25 \cdot 10^{-5}$	29,4

Finalmente, se ha simulado la uniformidad del riego y la presión en el punto de desagüe que correspondería a dichos emisores en las mismas condiciones de presión en cabeza pero en otros suelos uniformes también característicos de las zonas regadas.

3. Resultados y Discusión

La Figura 2 muestra la evolución del caudal en cabeza Q y pérdidas de carga hf de los ramales durante el riego. Los dos ramales de cada pareja se comportaron de forma similar. Tal como se había observado en emisores aislados (Shani et al. 1996, Gil et al. 2008), el caudal disminuye, de forma acusada, al principio del riego, en este caso, entre los primeros 600-800 s, y luego tiende a estabilizarse. La altura de presión en cabeza h_0 se mantiene, por lo que la altura de presión en cola h_L aumenta en el tiempo al disminuir Q y, por tanto, la hf .

La disminución de hf ha sido, también, más pronunciada en los primeros 600-800 s de riego en el modelo B que en el A, sobre todo, con las presiones más grandes. Sin embargo, este comportamiento no se ha observado en los ramales superficiales excepto un ligero descenso en el modelo compensante B, en los primeros 300 s, a la presión mayor.

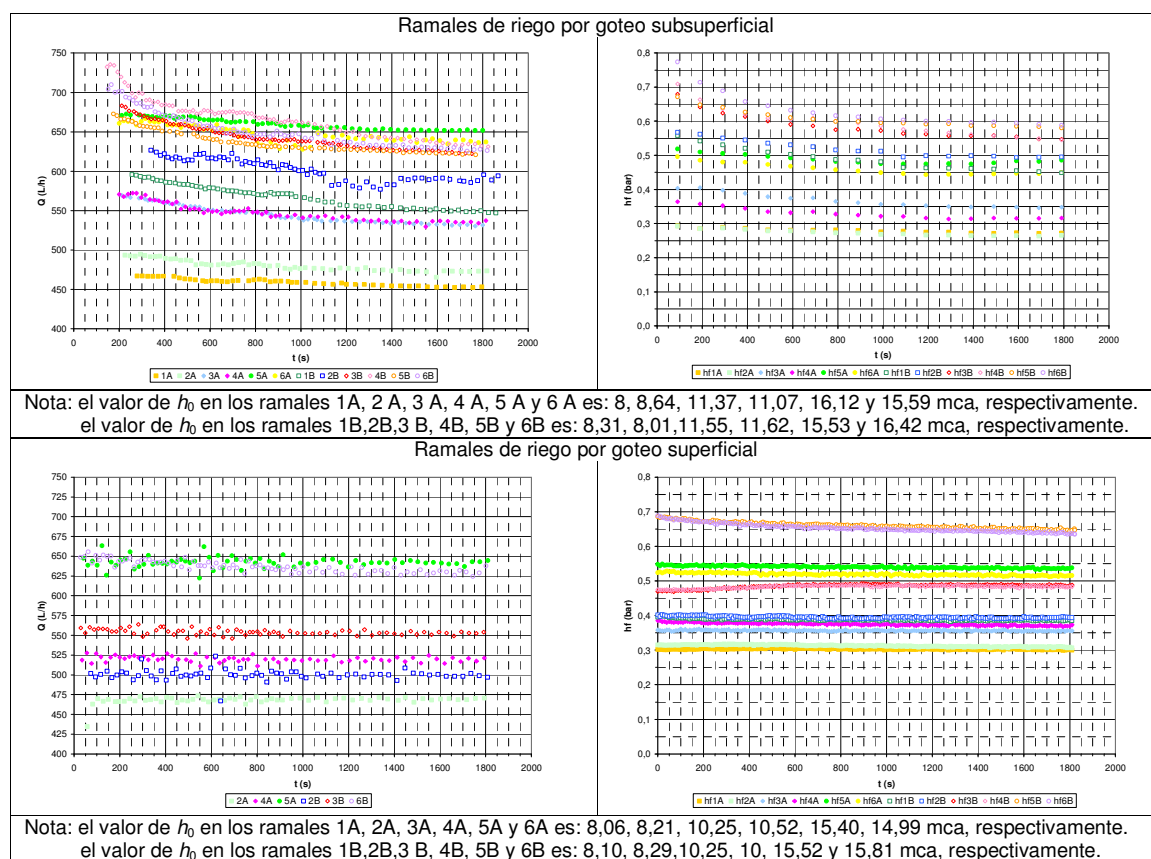


Figura 2. Evolución del caudal de ramal Q y de las pérdidas de carga hf durante el riego.

Estas observaciones ponen de manifiesto que la sobrepresión en el punto de desagüe del emisor h_s aumenta al principio del riego y luego se mantiene, tal como se había medido en emisores aislados (Shani et al. 1996, Lazarovich 2005 y Gil et al. 2008).

Los resultados muestran que el suelo afecta al caudal de los dos emisores, sobre todo al modelo B. En estos ramales, el elastómero del emisor todavía no habría adquirido su condición de regulación plena al acabar el riego. Para comprobar esta hipótesis se tomó una muestra de 24 emisores nuevos del mismo modelo y se pusieron en funcionamiento, todos ellos a una misma altura de presión, durante al menos dos horas, a presiones similares a la de los ensayos de los ramales. La variación del caudal en el tiempo se muestra en la Figura. 3.

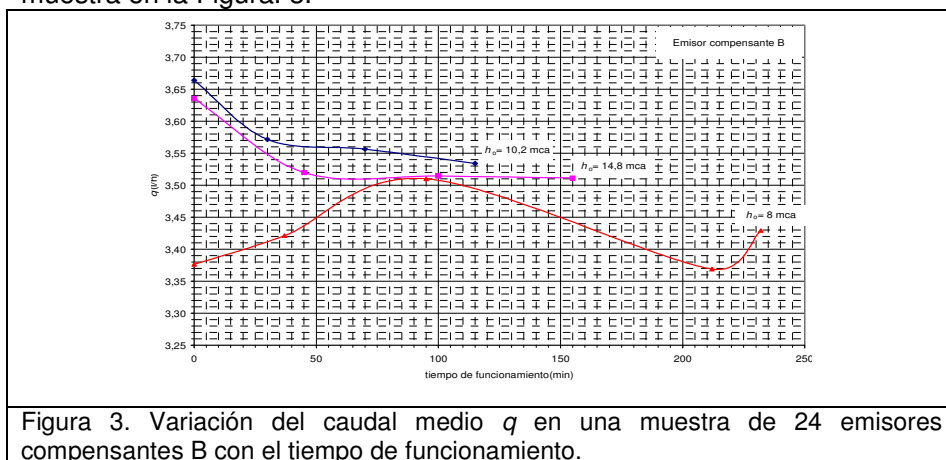


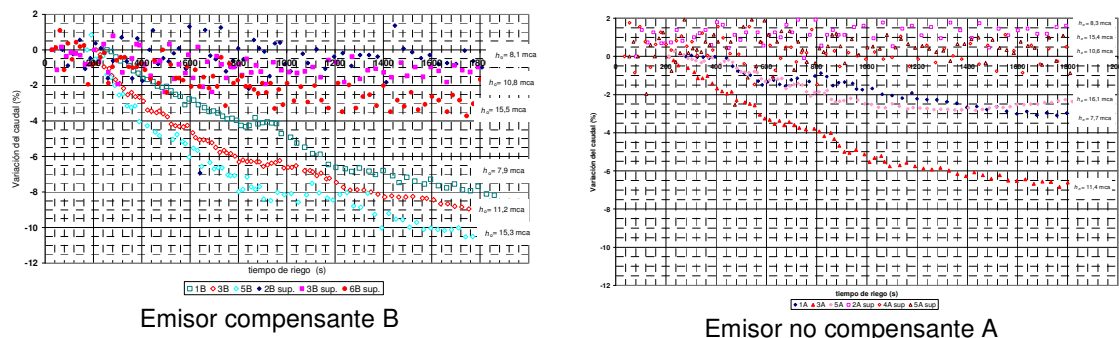
Figura 3. Variación del caudal medio q en una muestra de 24 emisores compensantes B con el tiempo de funcionamiento.

En los primeros 30 minutos se observa una disminución del caudal del 2,5 % y 3% con $h_0 = 10,2 \text{ mca}$ y $h_0 = 14,8 \text{ mca}$, respectivamente. Asimismo, el caudal se estabiliza antes en la presión mayor. Según estos resultados, cabe pensar, que durante el tiempo de riego (30 minutos), la variación de caudal observada en campo sería similar a la obtenida en laboratorio aunque, desde luego, en el ramal, dada la variación hidráulica, los emisores no trabajan todos a la misma presión. El efecto anterior no se observa a la presión más pequeña, puesto que se corresponde con el límite inferior de su rango de compensación (8 mca).

En la Figura 4 se presenta la variación de caudal de los ramales durante el riego. Los ramales superficiales compensantes se comportan de forma parecida a lo observado en la muestra de laboratorio, con una variación de caudal máxima de: 3,5 %, 2,7 % y menor del 1 % para $h_0 = 15$, 10 mca y 8 mca, respectivamente. En esta última, se observa la alternancia de variaciones de caudal positivas (el caudal aumenta) y negativas (el caudal disminuye) tal como se observa, también, en los no compensantes, dado que al estar trabajando por debajo del límite inferior de compensación los emisores se comportaron como no compensantes y, por tanto, la disminución del caudal debida al efecto de la presión en el elastómero no se observó. Sin embargo, en los ramales enterrados, trabajando a presiones similares, la disminución del caudal fue tres veces mayor que la de los ramales superficiales. Se observa, también, cómo este efecto no se muestra en el ramal con la altura de presión en cabeza menor ($h_0 = 8,1 \text{ mca}$), dado que, como se ha indicado arriba, al estar por debajo del límite inferior del rango de compensación del emisor, su comportamiento se asemeja al de los emisores no compensantes. Así, en la Figura 4 se observa como Q es muy parecido a las presiones mayores, mientras que es mucho menor en la presión más pequeña.

Rodríguez-Sinobas et al. (1999) observaron un comportamiento similar en un modelo de emisor compensante: el caudal disminuye con el tiempo de funcionamiento hasta que se estabiliza. Este efecto se atribuyó a la posible fatiga que sufre el material del elastómero con la presión. Cuando la presión cesa, el material elástico del elastómero recupera sus

propiedades y, en el siguiente riego, el caudal inicial dependerá del tiempo entre riegos: cuanto mayor sea éste, el caudal será mayor, puesto que el elastómero habrá tenido más tiempo para recuperar su condición inicial. Este efecto, por tanto, aparte del material del elastómero, estaría relacionado con su superficie. De los dos modelos estudiados por los autores, se observó que el de mayor superficie $2,56 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ sí mostraba el efecto mientras que, en el otro, con superficie $0,096 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, no se detectó. El elastómero del emisor B aquí estudiado tiene una superficie de $0,78 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$.



Nota: el subíndice _{sup}= ramal en superficie.

Figura 4. Variación del caudal durante el riego en ramales superficial y enterrados.

En la Figura 4 puede observarse, también, que la variación del caudal de los ramales superficiales, en los dos modelos, es aleatoria, por debajo del 2%. Sin embargo, en los ramales enterrados se produce una disminución del caudal durante el riego, aproximadamente, del 2,5 al 7 % en el modelo no compensante A, y entre el 7 % y el 13 % en el compensante B. En éste, la variación mayor se obtuvo con la mayor presión en cabeza, mientras que en el A correspondió a la presión de cabeza intermedia, siendo la variación en las otras dos presiones similar.

Los resultados evidencian el efecto del suelo en los dos emisores estudiados, lo que contradice las observaciones realizadas en emisores aislados (Shani et al. 1996; Gil et al. 2008) en las que el caudal de los emisores compensantes no disminuía en el tiempo si no se rebasaba la presión del límite inferior de compensación. Por lo que no tendría un valor general la recomendación dada por estos autores de seleccionar modelos compensantes en el proyecto de riego por goteo subsuperficial en suelos francos y arcillosos.

Por otra parte, en la Tabla 3 se muestran los valores de la presión media en el suelo en los puntos de desagüe \bar{h}_s del modelo no compensante A (determinados con la ec. [4]) y r_0 (obtenidos con la ec.[3]). Se ha considerado el caudal del ramal después de su estabilización y se han seleccionado las propiedades del suelo franco presentadas en la Tabla 2. La sobrepresión \bar{h}_s varía desde 0,55 a 1,36 mca y, puesto que el suelo tiene un valor de K_s pequeño, el valor de \bar{r}_0 es grande (de 0,015 a 0,028 m).

La uniformidad de la aplicación del agua en los ramales CV, estimada con el programa de simulación, considerando un suelo uniforme, se muestra en las Figuras 5 a y b. Se observa que el riego por goteo subsuperficial tendría mayor uniformidad que el superficial. Para una misma altura de presión en cabeza h_0 , CV disminuye al disminuir el radio de la cavidad esférica r_0 y, para un mismo r_0 , CV disminuye al reducir h_0 (ver Figura 5 a). Para valores de r_0 y h_0 dados, la autorregulación del caudal, producida por el efecto del suelo, es mayor en suelos de menor conductividad hidráulica saturada (suelos franco y arcilloso) (ver Figura 5b).

Tabla 3. Estimación de \bar{h}_s (ec. [4]) y \bar{r}_0 (ec. [3]) en los riegos de los ramales con el emisor no compensante A.

	RAMAL					
	1A	2A	3A	4A	5A	6A
\bar{h}_s (mca)	0,55	0,77	1,36	1,34	0,95	1,15
\bar{r}_0 (m)	0,028	0,022	0,015	0,015	0,025	0,021

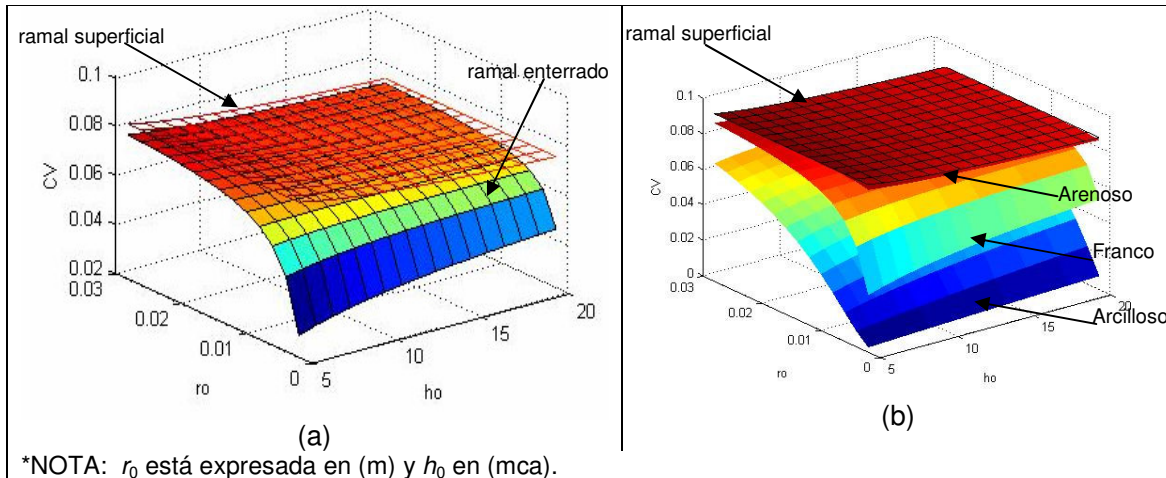


Figura 5. Uniformidad del riego, en función de r_0 y h_0 , del ramal no compensante A en suelos uniformes: (a) suelo franco del estudio y (b) comparación entre suelos.

Por otra parte, a pesar de que las presiones bajas en cabeza de ramal mejoran la uniformidad respecto al riego superficial, puesto que, en éste, cuanto mayor es la presión en cabeza menor es la variabilidad del caudal, h_0 no debería ser muy pequeña, si se quiere una uniformidad alta.

Los resultados de la simulación correspondiente a las condiciones de los ramales ensayados considerando un suelo homogéneo (ver Tabla 4) predicen relativamente bien los resultados experimentales. La uniformidad de aplicación del agua para las condiciones de riego de los ramales fue buena. Se estimaron valores de CV desde 0,077 y 0,082. Asimismo, se observa que, en las mismas condiciones, la uniformidad del riego subsuperficial sería mejor que la del riego superficial. Los valores correspondientes al coeficiente de variación de la presión en el suelo CVh_s son ligeramente mayores a los observados para el caudal y oscilan entre 0,081 y 0,093.

4. Conclusiones y Recomendaciones

El caudal del ramal se reduce a lo largo de los 30 min del riego, siendo la reducción más acusada en los primeros 10 min, por lo que la tendencia concuerda con la observada en emisores aislados. La reducción fue mayor en el emisor compensante (del 6 % al 13 %) que en el no compensante (del 2,5% al 7%), lo que difiere de las observaciones realizadas con emisores aislados por otros autores.

En el modelo compensante la reducción de su caudal pudo ser debida por una parte, por el aumento de la sobrepresión en el suelo y, por otra, al efecto de fatiga de su elastómero, que es más acusado a presiones mayores.

La representación gráfica de simulaciones de la evolución de la uniformidad de aplicación del agua en ramales de riego por goteo subsuperficial, respecto de la variable de operación presión en cabeza de ramal, puede ayudar a la toma de decisiones del manejo del riego. En suelos uniformes, la uniformidad del riego subsuperficial del emisor no compensante, en ramales de las características de los evaluados, es parecida al riego superficial en suelos arenosos y ligeramente mayor que éste en suelos francos y arcillosos.

Tabla 4. Comparación entre las estimaciones realizadas con la simulación de la distribución del agua y las observaciones de campo realizadas en ramales del emisor no compensante A en el suelo franco uniforme

	VALORES MEDIDOS						VALORES SIMULADOS					
	1A	2A	3A	4A	5A	6A	1A	2A	3A	4A	5A	6A
\bar{q} (L/h)	2,76	2,88	3,27	3,29	3,96	3,87	2,79	2,82	3,21	3,18	3,95	3,87
h_0 (mca)	8,0	8,5	11,4	11,2	16,1	15,7	8,1	8,5	11,4	11,2	16,1	15,7
h_L (mca)	5,3	6,0	7,9	7,9	11,2	11,1	5,4	5,8	8,0	7,8	11,1	10,9
\bar{h}_s (mca)	0,55	0,77	1,36	1,34	0,95	1,15	0,55	0,76	1,40	1,39	0,94	1,14
\bar{r}_0 (m)	0,028	0,022	0,015	0,015	0,025	0,021	-	-	-	-	-	-
CV_{sup}	-	-	-	-	-	-	0,085	0,085	0,083	0,083	0,081	0,081
CV_{ent}	-	-	-	-	-	-	0,082	0,080	0,077	0,077	0,078	0,078
CVh_s	-	-	-	-	-	-	0,093	0,088	0,081	0,081	0,085	0,083

Nota: el subíndice $_{sup}$ = ramal en superficie y $_{ent}$ = ramal enterrado.

5. Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) por su apoyo a través del proyecto AGL2004-01689. Asimismo, desean agradecer la colaboración del Centro de Tecnología del Regadío (CENTER) por su apoyo en el desarrollo experimental.

6. Bibliografía

- Carsel, R.F., Parrish, R.S. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.* 24: 755-769.
- Gardner, W.R. 1958. Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Science* 85: 228-232.
- Gil, M., Rodríguez-Sinobas, L., Juana, L., Sánchez, R., Losada, A. 2008. Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils. Effect on water application uniformity. *Irrigation Science*. (Springer): In press.
- Lazarovitch, N., Simunek, J., Shani, U., 2005. "System dependent boundary conditions for water flow from a subsurface source". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69.
- Lazarovitch, N., Shani, U., Thompson T.L., A.W. Warrick. 2006. Soil hydraulic properties affecting discharge uniformity of gravity-fed subsurface drip irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 132: 531-536.
- Philip, J.R. 1992. "What happens near a quasi-linear point source?" *Water Resour. Res.* 28:47-52.
- Rodríguez-Sinobas, L., Juana, L., Losada, A. 1999. Effects of temperature changes on emitter discharge. *J.Irrig. and Drain. Eng.* 125(2): 64-73.
- Shani, U., Xue, S., Gordin-Katz, R., Warrick, A.W.. 1996. "Soil-limiting flow from subsurface emitters. I: Pressure measurements". *J. Irrig. Drain. Engin.* ASCE. 122(5): 291-295.
- Warrick, A.W., Shani U. 1996. "Soil-limiting flow from subsurface emitters. II: Effect on uniformity". *J. Irrig. Drain. Eng.* ASCE. 122(5): 296-300.